空气横掠圆管表面传热特性实验与数值仿真研究

——基于虚实结合的创新实验教学实践

王文豪，翁佳鑫，肖矾
东莞理工学院 化学工程与能源技术学院，广东东莞 523808

1. 研究背景与目的

- 空气横掠圆管是传热学中典型的外部强制对流问题。传统实验教学过程中仍存在稳态等待时间长、实验工况有限、流动现象不可视以及学生自主探究不足等问题。
- 基于COMSOL Multiphysics构建并验证数值模型，利用流场和温度场可视化揭示不同 *Re* 数下的边界层发展与绕流脱体特征，形成虚实结合实验教学模式。

2. 实验系统与方法

2.1实验方法

- 实验测定圆管平均表面传热系数h，并以 *Re* 数和 *Nu* 数表征空气流动及对流换热特性
- 平均表面传热系数

$$h=\frac{Q_{conv}}{A(T_{\mathrm{w}}-T_{\infty})}$$

- 准则方程

$$Nu=CRe^{n}Pr^{\frac{1}{3}}$$

- 雷诺数与努塞尔数

$$Re=\frac{U_{\infty}d}{\upsilon}\qquad Nu=\frac{hd}{\lambda}$$

d——圆管外径；u_{∞}——来流速度；
T_{w}——圆管壁面平均温度；
T_{∞}——来流温度

2.2实验装置

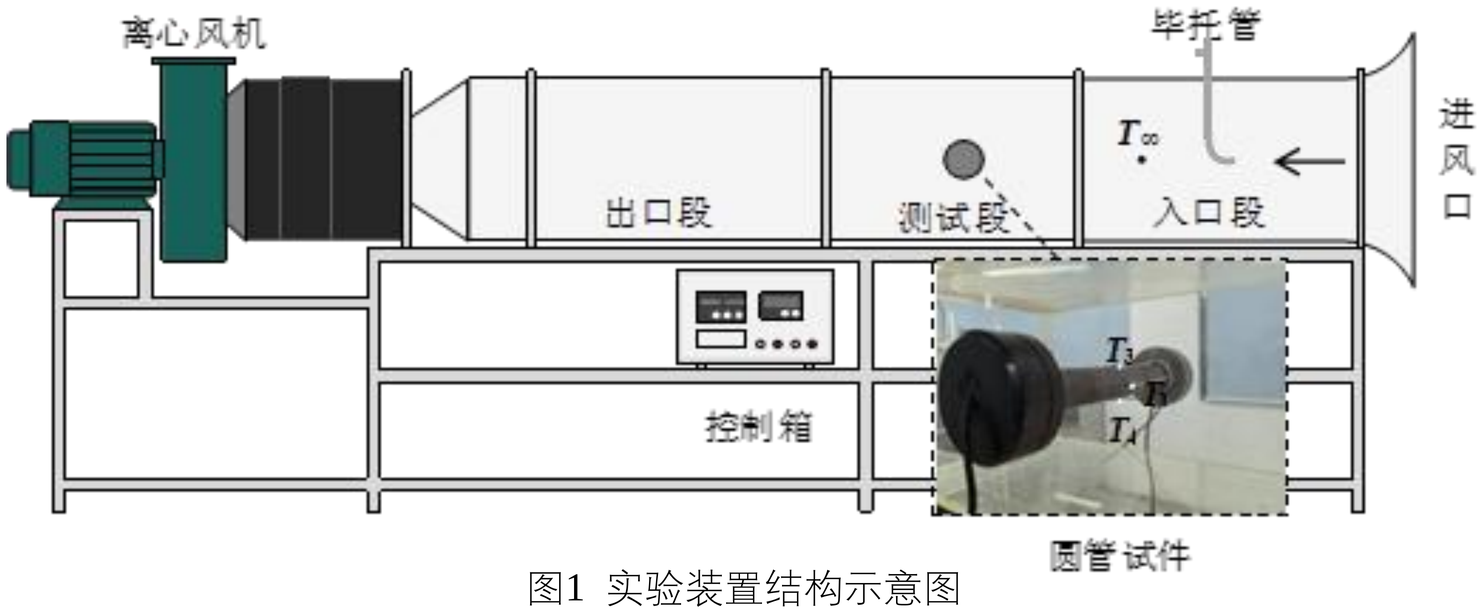


图1 实验装置结构示意图

3. 数值仿真模型搭建

- 数值模型：如图2所示，模型尺寸为 40 cm× 40 cm× 60 cm，其中央水平安装了直径为 3.4 cm 的圆管试件，三维、稳态、不可压缩空气流动；采用 k-ε 湍流模型。

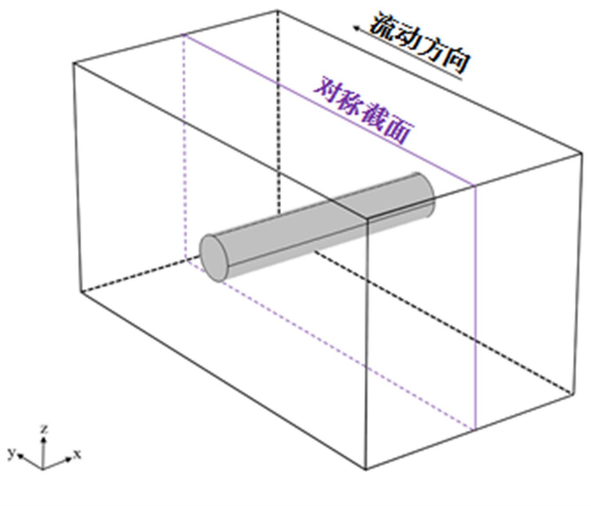


图2 物理模型

4. 结果与讨论

4.1 实验结果分析

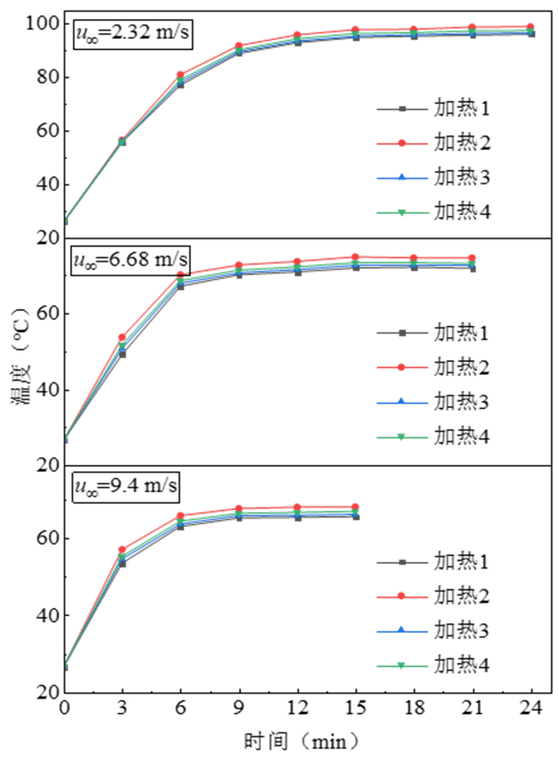


图3 圆管管壁温度变化情况

- 由图 3 可知，开启加热后，管壁温度快速上升后趋于平稳，即达到了热平衡状态。
- 随着来流速度的增大，系统达到热平衡状态所需时间越短。

4.2 仿真结果分析

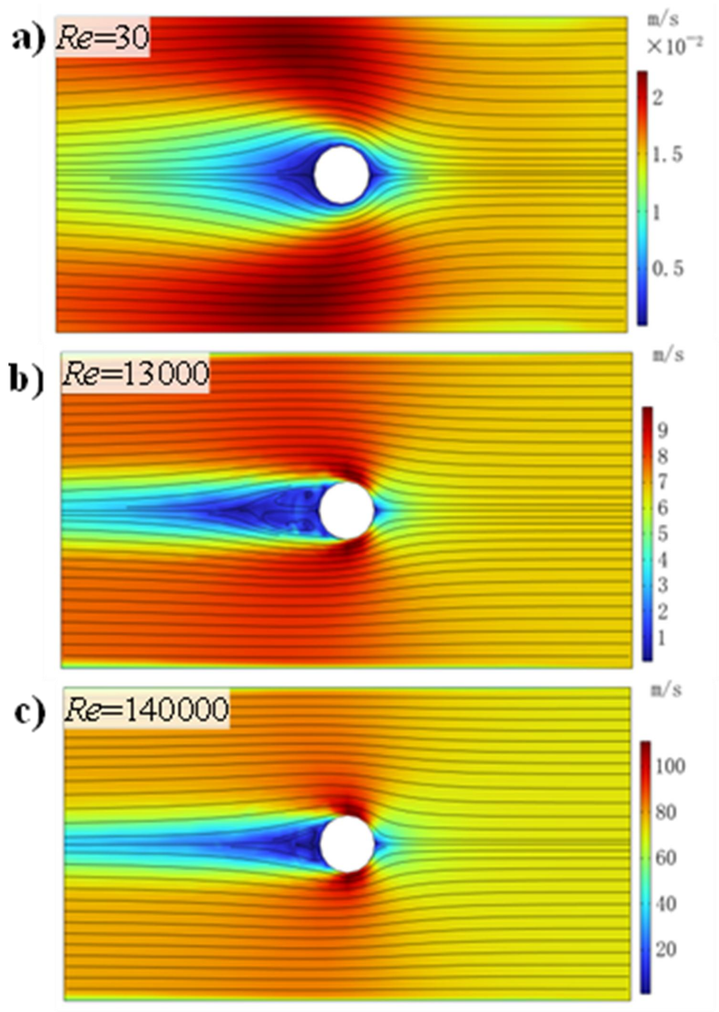


图4 通道内对称截面的流场情况

- *Re*不断增大，管壁附近仍存在明显的速度梯度变化（图4）。
- 随着*Re*升高，管内流速由低*Re*的平缓无脱体，以粘性力为流动主导，转为高*Re*的边界层减薄、背风侧旋涡增强并脱体，扰动掺混加剧，传热*Nu*提高。

4.3 结论

- 研究构建并验证了空气横掠圆管表面传热的数值仿真模型，直观地揭示了流动与传热的耦合机理，有效提升学生的自主探究能力。

参考文献：
[1]周乃香,袁学良,张井志. 基于模块化实验平台的传热学实验课程教学改革探索[J]. 中国现代教育装备, 2025, No.461(13): 81-83..
[2]华君叶,王瑞林,牛宝联. 虚拟-实训递进式综合性实验教学模式探索——以“能源生产过程控制”课程为例[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(11): 191-194+208.
[3]孙始财,谷林霖. 创新型传热学导热系数教学实验的设计与实践[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(08): 208-214.